

С.К.БЕРЕЗКА, зав. лабораторией, НТУ "ХПИ"
А.А. МИНЧЕНКО, канд.техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРОЗОЗАЩИТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ И ВЫШЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЁ ИСПЫТАНИЙ

Розглянуті математичні аспекти удосконаленої моделі грозозахисту повітряних ліній електропередачі напругою 110 кВ і вище та результати, що отримані при її випробуванні.

Рассмотрены математические аспекты усовершенствованной модели грозозащиты воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше и результаты, полученные при её испытании

Mathematics realization of lightning defense model of overhead transmission lines of 110 kV and more high voltage and its test results are discussed.

Постановка проблемы. Расчет ожидаемого числа грозовых отключений воздушных линий (ВЛ) электропередачи напряжением 110 кВ и выше, отвечающий условиям физики процесса при разряде молнии, для которых независимые случайные величины амплитуда и максимальная крутизна волны тока молнии достигаются в различные моменты времени при условии нулевой производной тока молнии в начальный момент времени, требует разработки соответствующей методики или совершенствования существующих. Совершенствование математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом ведется с использованием современных вычислительных операций и должно базироваться на результатах соответствующих численных экспериментов.

Анализ публикаций. Наиболее полная методика расчета грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом изложена в "Руководстве" [1]. Постановка задачи совершенствования этой методики путем представления в ней формы волны тока молнии, отвечающая условиям физики процесса при разряде молнии, была отображена в работах [2,3]. В работах [3,4] предложена аппроксимация формы волны тока молнии, отвечающая условиям процесса при разряде молнии в ВЛ, а в работе [5] изложен подход к решению задачи совершенствования моделирования грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом при условии указанной выше аппроксимации.

Цель статьи. Изложение основных положений совершенствования моделирования грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом и результатов вычислительных экспериментов.

Основная часть.

Принимаем взаимно независимыми амплитуду и максимальную крутизну тока молнии для предложенной в работах [3,4] аппроксимации формы волны импульса. Используем логарифмически нормальное распределение токов молнии [1,6]. Плотность вероятности распределения амплитуды тока молнии:

$$f(I_M) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg I} \sqrt{2\pi} I_M} \exp \left[-\frac{(\lg I_M - \overline{\lg I_M})^2}{2\sigma_{\lg I}^2} \right], \quad (1)$$

где $\overline{\lg I_M}$ – математическое ожидание логарифма амплитуды тока молнии;

$\sigma_{\lg I}$ – среднее квадратическое отклонение логарифма амплитуды.

Аналогично [1,6] для максимальной крутизны импульсов тока молнии:

$$f(A_{M \max}) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg A} \sqrt{2\pi} A_{M \max}} \exp \left[-\frac{(\lg A_{M \max} - \overline{\lg A_{M \max}})^2}{2\sigma_{\lg A}^2} \right], \quad (2)$$

где $\overline{\lg A_{M \max}}$ – математическое ожидание логарифма максимальной крутизны тока молнии;

$\sigma_{\lg A}$ – среднее квадратическое отклонение логарифма максимальной крутизны.

Тогда вероятность попадания значений амплитуды тока молнии в интервал $[I_{M i-1}, I_{M i}]$ будет равна [7]:

$$P(I_{M i-1} \leq I_M < I_{M i}) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg I} \sqrt{2\pi}} \int_{I_{M i-1}}^{I_{M i}} \frac{1}{I_M} \exp \left[-\frac{(\lg I_M - \overline{\lg I_M})^2}{2\sigma_{\lg I}^2} \right] dI_M. \quad (3)$$

Аналогично, вероятность попадания значений максимальной крутизны тока молнии в интервал $[A_{M \max i-1}, A_{M \max i}]$ будет равна

$$P(A_{M \max i-1} \leq A_{M \max} < A_{M \max i}) = \frac{\lg e}{\sigma_{\lg A} \sqrt{2\pi}} \int_{A_{M \max i-1}}^{A_{M \max i}} \frac{1}{A_{M \max}} \exp \left[-\frac{(\lg A_{M \max} - \lg A_{M \max})^2}{2\sigma_{\lg A}^2} \right] dA_{M \max} \cdot (4)$$

Определяя вероятности по выражениям (3) и (4) для каждого из задаваемых интервалов $[I_{M i-1}, I_{M i}]$ и $[A_{M \max i-1}, A_{M \max i}]$ на принятых интервалах вариаций значений величины I_M и $A_{M \max}$, производим, тем самым, аппроксимацию кривой логарифмически нормального распределения дискретной ступенчатой функцией. При этом длины указанных задаваемых интервалов равны соответствующим шагам дискретизации $\Delta I_M = I_{M i} - I_{M i-1} = \text{const}$ и $\Delta A_{M \max} = A_{M \max i} - A_{M \max i-1} = \text{const}$ ($i = \overline{1, n}$). Тогда количество попаданий из общего числа испытаний N в каждый из интервалов $[I_{M i-1}, I_{M i}]$ и $[A_{M \max i-1}, A_{M \max i}]$ будет равно соответственно:

$$N_{\Delta I_M} = P(I_{M i-1} \leq I_M < I_{M i}) N, \quad (5)$$

$$N_{\Delta A_{M \max}} = P(A_{M \max i-1} \leq A_{M \max} < A_{M \max i}) N. \quad (6)$$

Таким образом в задаваемом числе статистических испытаний N стохастической модели перекрытия гирлянды изоляторов ВЛ имеем на каждом шаге дискретизации величин I_M и $A_{M \max}$ вполне определенное число значений I_M (аналогично и $A_{M \max}$), т.е. $N_{\Delta I_M}$ и $N_{\Delta A_{M \max}}$, обеспечивая тем самым используемую плотность вероятности распределения токов молнии.

Моделирование процесса перекрытия линейной изоляции производится следующим образом. На ЭВМ организуется генерация пары значений I_M и $A_{M \max}$. Из базы данных ЭВМ выбираются соответствующие этой паре значения I_0 , T_1 и T_2 , позволяющие воспроизвести предложенную в работах [3,4] модель волны тока молнии; для отмеченной совокупности значений величин известны также τ_ϕ (длительность фронта) и t_{AM} (момент времени, при котором крутизна тока молнии максимальная). Эта модель следующая [3,4]:

$$i_M(t) = I_0 \left[e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} - \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \frac{t}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right], \quad (7)$$

где I_0 – постоянная, определяемая амплитудой тока;
 T_1 , T_2 – постоянные, определяемые возрастом и спадом волны тока.

Момент перекрытия линейной изоляции при $t=t_{\text{пер}}$ устанавливается по критерию выполнения известного условия, что сумма импульсного напряжения $U_{\text{имп}}(t)$ и рабочего напряжения провода $u_p(\phi)$ достигает разрядного напряжения линейной изоляции $U_{\text{разр}}^+(t)$ [1].

В усовершенствованной математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ электропередачи 110 кВ и выше требуется, как и в исходной методике [1], решение детерминированной задачи распределения тока молнии между опорой и тросом как при прямых ударах в опору, тока и в трос в середине пролета. Здесь используются те же схемы замещения, что и в работе [1], но модель волны тока молнии отвечает условиям уравнения (7). Тогда при каждом статистическом испытании стохастической модели перекрытия гирлянды изоляторов ВЛ установление распределения тока молнии в соответствии с моделью (7) между опорой и тросом производится путем решения дифференциальных уравнений явным одношаговым методом первого порядка, предложенным Эйлером.

Следует отметить, что разрядное напряжение линейной изоляции $U_{\text{разр}}^+(t)$ определяется вольт-секундной характеристикой в соответствии с работой [8] как

$$U_{\text{разр}}^+(t) = \frac{U_{50\%}^+}{1,145} \sqrt{1 + \frac{3,1}{t_{\text{пред}}}}, \quad (8)$$

где $U_{50\%}^+$ – 50%-ное импульсное разрядное напряжение гирлянды при полной волне для положительной полярности на проводе (приблизительно соответствующее $\tau_{\text{пред}} = 20$ мкс), кВ;

$t_{\text{пред}}$ – предразрядное время, мкс.

Расчет 50%-ного разрядного напряжения для импульса положительной полярности с длительностью фронта τ_ϕ более длительности фронта стандартного импульса (1,2/50 мкс) производится в соответствии с работой [1] по выражению

$$U_{50\%}^+(\tau_\phi) = U_{50\%}^+ \left(0,45 + \frac{9}{\tau_\phi^{0,9} + 15} \right). \quad (9)$$

При генерации из базы данных ЭВМ значений I_M , $A_{M \max}$, I_0 , T_1 и T_2 известны также значения τ_ϕ и t_{AM} . Принимая допущение, что вольт-секундная характеристика линейной изоляции определяется по выражению (8) не только для случаев с $U_{50\%}^+$, но и при $U_{50\%}^+(\tau_\phi)$, производится вычисление по выражению (9) 50%-ного разрядного напряжения с длительностью фронта τ_ϕ , значение которого генерировано

из базы данных ЭВМ в составе указанных ранее значений. Далее, по выражению (8) в процессе пошагового наращивания времени $t = t_{\text{пред}}$ определяется вольт-секундная характеристика линейной изоляции и проверяется выполнение условия ее перекрытия.

Таким образом в усовершенствованной математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше, в отличие от работы [1], используется одна и та же разрядная характеристика как при прямых ударах в опору, так и в трос в середине пролета. В работе [1] в первом случае используется вольт-секундная характеристика гирлянд изоляторов для разрядов на косоугольном фронте, которая получена с использованием 50%-ных разрядных напряжений при испытательном импульсе стандартной формы, а во втором – 50%-ное разрядное напряжение для импульса положительной полярности. Учитывая то, что в усовершенствованной модели грозозащиты ВЛ определение длительности фронта импульса тока молнии производится по выполнению условия $i_m(t)|_{t=\tau_{\text{ф}}} = I_m$,

отличающегося от определения длительности фронта косоугольного импульса в работе [1], использование разрядного напряжения $U_{\text{разр}}^+(t)$ в соответствии с выражениями (8) и (9) представляется обоснованным.

Выполненное совершенствование модели грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом предполагается использовать при выборе наибольшего значения сопротивления растеканию заземляющих устройств опор ВЛ. Поэтому совершенствование не коснулось рассмотрения прорывов молнии через тросовую защиту на провода ВЛ; число прорывов от значения указанного выше сопротивления не зависит.

Необходимое число статистических испытаний математической вероятностной модели грозозащиты ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше установлено на основе вычислительного эксперимента. По исходным данным ВЛ 110 кВ на опорах ПБ110-8 при ударе молнии в опору в зависимости от числа испытаний получен разброс вероятности перекрытия изоляции на опоре (см. рис. 1).

Из вычислительного эксперимента следует, что число статистических испытаний при моделировании грозозащиты ВЛ напряжением 110 кВ и выше должно быть не менее 10^5 .

Выводы.

Усовершенствованная математическая модель грозозащиты ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше с тросом реализуется на основе современных вычислительных операций и, по сравнению с исходной моделью, более адекватна отображает процессы при поражениях молнией ВЛ.

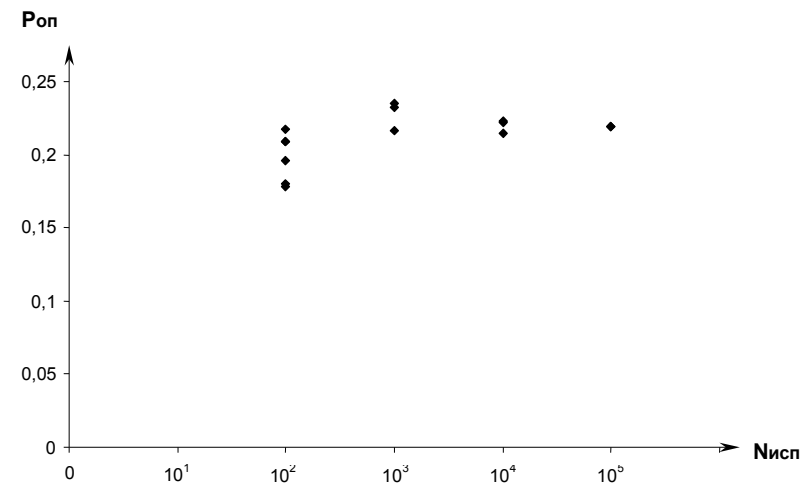


Рис. 1 – Разброс вероятности перекрытия изоляции на опоре

Список литературы:

1. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений, РД 153-34.3-35.125-99. – М.: РАО «ЕЭС России», 1999. – 184 с.
2. Кадомская К.П. Моделирование волны тока молнии при расчётах грозоупорности электрических сетей / К.П. Кадомская, А.А. Рейхердт // Электричество. – 2006. – №11. – С.17–23.
3. Гуль В.И. Моделирование грозových перекрытий на воздушных линиях электропередачи с использованием метода статистических испытаний / В.И. Гуль, С.К. Березка // Энергетика и электрификация. – 2007. – №6. – С. 35–39.
4. Березка С.К. Модель волны тока молнии при расчетах грозоупорности воздушных линий электропередачи / С.К. Березка, А.А. Минченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, випуск 11 (186), Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». – 2011. – С. 41-43.
5. Березка С.К. Удосконалення моделювання грозозахисту повітряних ліній електропередавання напругою 110 кВ та вище / С.К. Березка, А.А. Минченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції, ч. II ,01-03 червня 2011. – Харків, НТУ “ХПІ”. – 2011. –195 с..
6. Костенко М.В. Грозозащита подстанций и электрических машин высокого напряжения. Серия “Электрические станции и сети” (Итоги науки и техники) / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов // М.:ВИНИТИ,1987. – №13.– 112 с.
7. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев // – М.: Наука, 1965. – 524 с.
8. Руководящие указания по расчету грозозащиты воздушных линий электропередачи 3–750 кВ, 10890тм-Т1 (проект). Л: НИИПТ, 1982 – 187с.

Поступила в редакцию 06.10.2011